# 6. Utilisation de technologies innovantes

## 6.1 Présentation des résultats du projet : the role of geomatics for territory monitoring

Fulvio RINAUDO *(Politecnico di Torino)*

Cette présentation résume les résultats issus des activités du contrat de recherche « Utilisation de la géomatique pour la surveillance des mouvements gravitaires du territoire valdotain », dans le cadre du programme Interreg IIIA RiskYdrogeo. Cette recherche a été conduite par le DITAG du Politecnico di Torino, sous la coordination de Fulvio Rinaudo et avec la participation d'Andrea Biasion, Enrico Borgogno Mondino, Leandro Bornaz, Fabio Giulio Tonolo et Andrea Lingua.

L'objet de la recherche est de valider les techniques photogramétriques, LIDAR et SAR, instruments opérationnels pour la description géométrique d'événements dynamiques sur le territoire, dans une optique de prévention et dans des conditions d'intervention d'urgence.
La recherche s'est déroulée en trois phases :

- analyse de l'état de l'art des techniques de relevé de terrain pour la modélisation du territoire : cette étape est terminée ;
- expérimentation d'un système LIDAR depuis hélicoptère : l'acquisition des données et leur traitement sont terminés, l'interprétation opérationnelle des résultats est en cours de finalisation ;
- établissement de normes techniques pour la réalisation de relevés du territoire : cette étape est en cours de rédaction et sera définie sur la base des résultats de la phase précédente.

**Les systèmes de surveillance environnementale**

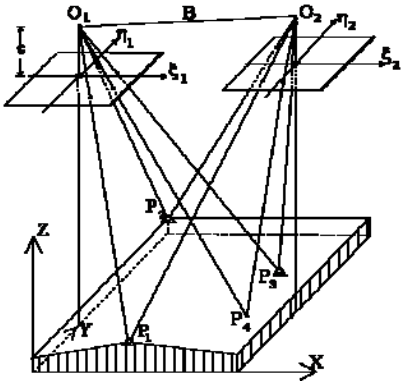
La surveillance des mouvements gravitaires représente une des plus importantes actions actuelles de protection du territoire. Les paramètres utilisés nécessitent toujours une approche de type interdisciplinaire.
Les techniques actuellement utilisées sont de type géomatique, géotechnique et géologique. Les techniques classiques de la géomatique consistent en des relevés, à intervalles de temps prédéfinis, d'une série discrète et limitée de points considérés utiles à la description du phénomène gravitaire. Ces relevés sont réalisés par topographie terrestre (station totale motorisée automatique), ou par une technique satellitaire (GPS). L'ensemble de ces technologies peut être utilisé de façon directe ou par télédétection (permet l'institution de véritables centrales de surveillance géométrique). Ces solutions, installées seulement sur des phénomènes très actifs et bien délimités, fournissent une précision millimétrique. Elles font partie de la série d'interventions qu'aujourd'hui n'importe quel système de surveillance comporte dans les protocoles d'intervention d'urgence. Leur implémentation nécessite des investissements lourds, mais la technologie est fiable et indispensable en complément des systèmes de surveillance géotechniques et géologiques.

Il est cependant possible de concevoir de nouveaux instruments de surveillance du territoire qui peuvent être utilisés en intervention préventive, en présence d'indicateurs de danger, avant de décider d'intervenir, si cela est jugé nécessaire, avec des systèmes ponctuels de haute précision. Il s'agit de techniques capables d'intervenir sur de larges zones en un temps restreint et dont le traitement des données est principalement automatique. Caractérisées par une précision d'un ordre de grandeur inférieur aux techniques géodésiques traditionnelles, elles peuvent contribuer à la mise au point d'un système de surveillance continue d'un territoire.

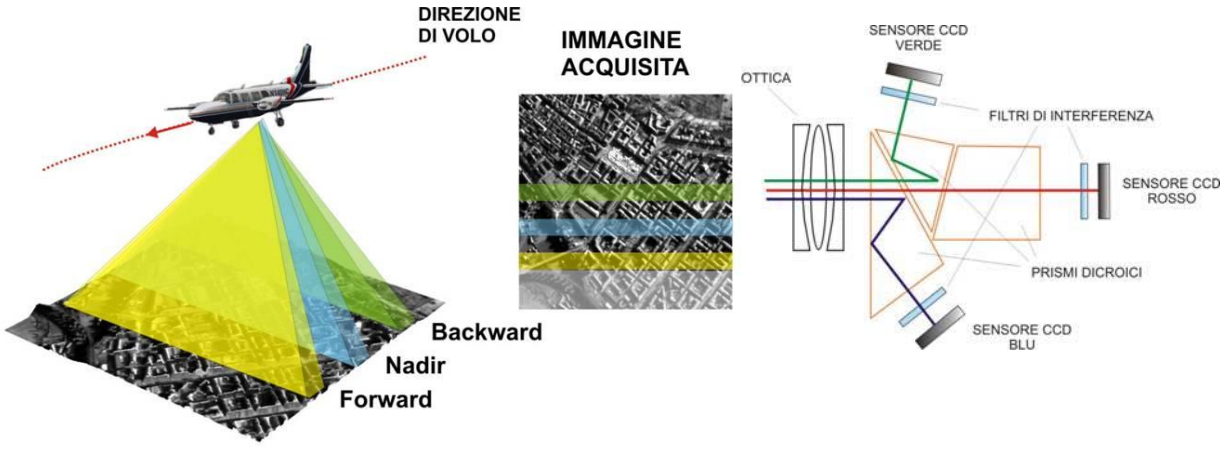
**Techniques de relevé territorial**

Les techniques présentées ici ne sont pas nouvelles dans le domaine de la géomatique : il s'agit de la photogrammétrie, du LIDAR et du SAR. Les innovations technologiques récentes telles que l'auto-corrélation d'images digitales, l'utilisation de plateformes inertielles pour le GPS, la disponibilité toujours plus grande de couverture satellitaire et les nouvelles techniques de traitement des données, offrent de nouveaux produits de relevés métriques qui, avec une précision peu élevée, permettent d'obtenir des informations sur de vastes portions de territoire dans un temps bref et avec des investissements limités. La suite de cette présentation se focalise sur l'application des trois techniques qui peuvent avoir un intérêt dans un système de surveillance élargi, avec comme but premier la prévention et la prévision des phénomènes dynamiques.

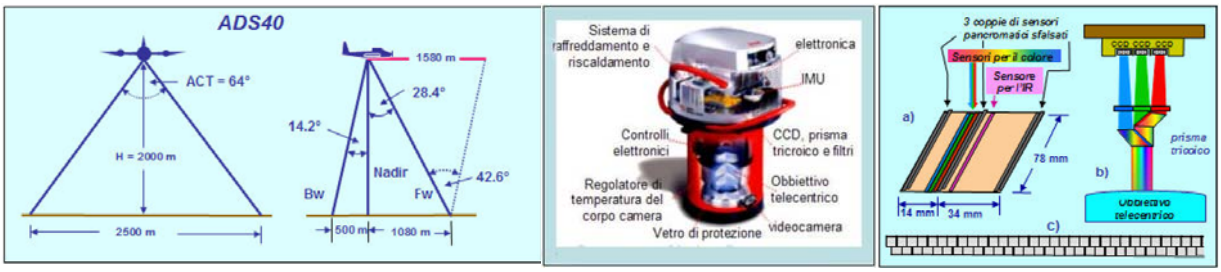
**(1) Photogrammétrie**



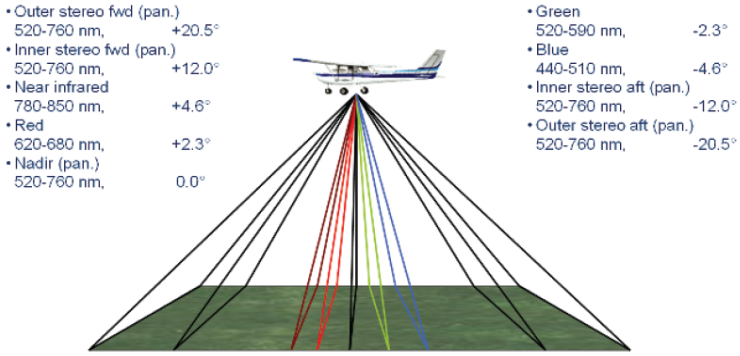

Principes (rappels) : la photogrammétrie nécessite deux images d'un même objet pour déterminer ses coordonnées dans un système de référence approprié. Pour cela, il faut connaître a priori les conditions géométriques dans lesquelles se sont formées les perspectives centrales (orientation externe) ainsi que les différences entre les images effectivement utilisées et les perspectives centrales théoriques requises par la technique (orientation interne).
Dans les applications aériennes, l'orientation interne doit être connue a priori. L'utilisation de caméras non métriques n'est pas rentable et ne permet pas de prévoir les précisions obtenues. Pour les applications qui nous intéressent, l'utilisation de caméras photographiques à pellicule est à exclure, car les images acquises devraient ensuite être digitalisées, ce qui prendrait trop de temps.
Acquisition de données : depuis quelques années, il est possible d'installer des cameras digitales de petit format sur des avions et des hélicoptères. Cette application est en fait limitée à l'installation sur les hélicoptères pour garantir la reprise nécessaire à la production d'ortophotos digitales ou plus rarement des prises stéréoscopiques. Plus récemment sont apparues les caméras métriques digitales de grand format montées sur avions. Il existe une technique qui change la solution utilisée des capteurs satellites, pour lesquels l'image est acquise par un capteur linéaire qui enregistre en continu la radiométrie réfléchie par le terrain, générant des images à perspective centrale multiple, qui nécessite des traitements particuliers pour la solution du problème photogrammétrique.



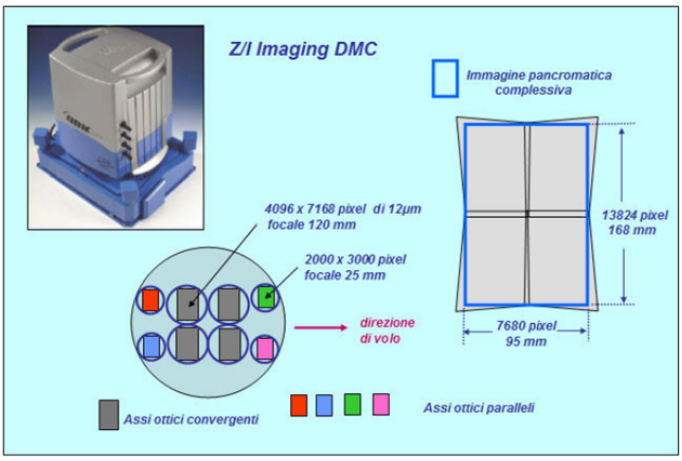
La camera Leica ADS 40 est actuellement la plus utilisée en Europe: à 2 000m d'altitude, le pixel de la caméra couvre une surface de 10x10 cm. Pour la camera JAS150 JENA, à 3 000 m son pixel couvre une surface de 8,8 x 8,8 cm. Elles permettent donc d'acquérir rapidement de grandes portions de territoire (schémas ci-dessous).



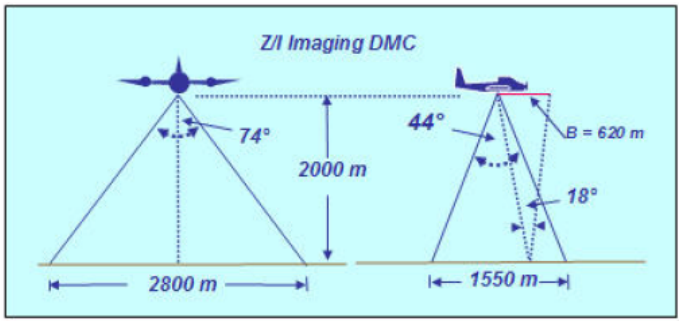

Caméra ADS40 LEICA



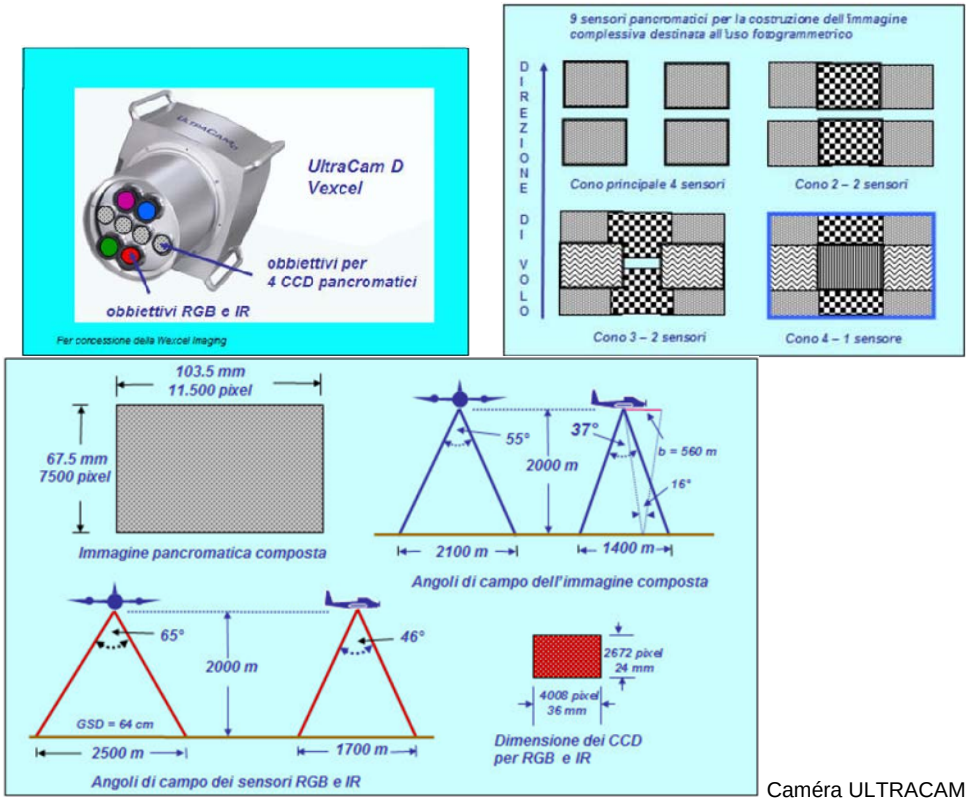
Caméra JAS150 JENA



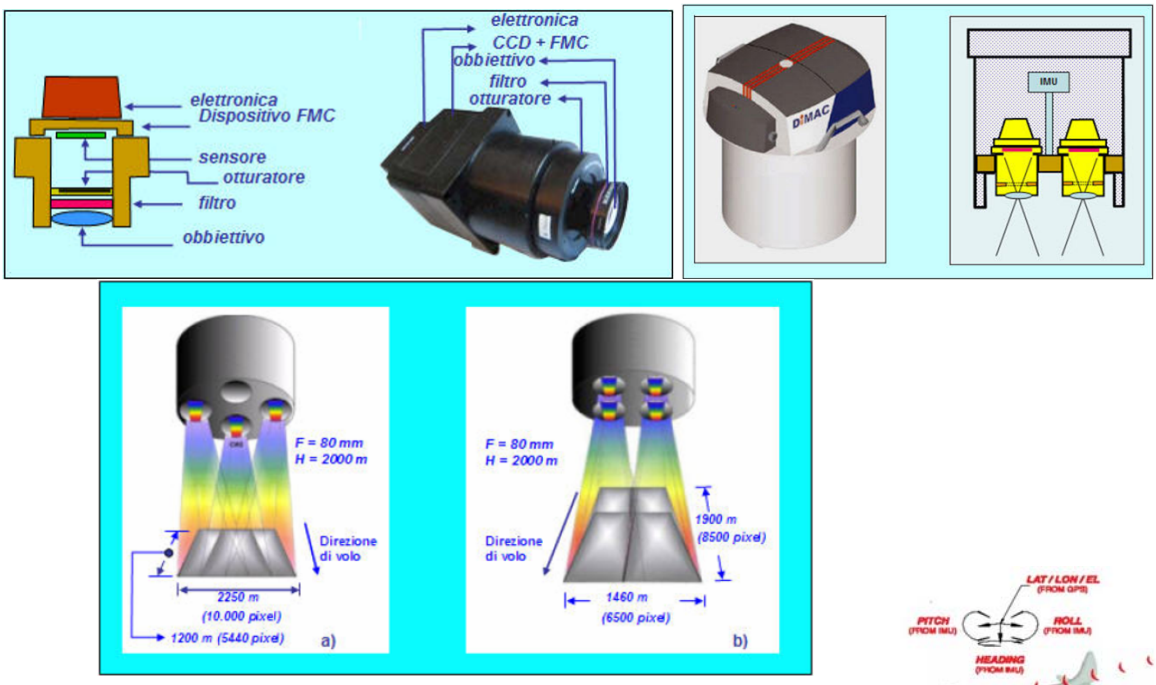

Un deuxième type de caméra génère un grand format à perspective centrale unique, utilisant un ensemble de 2 à 4 capteurs aériens. Avec la caméra DMC Zeiss/Imaging, à 2000m d'altitude le pixel couvre à terre environ 20 cm (schéma ci-contre) ; pour la caméra Utltracam D Vexcel, à 2000m le pixel couvre également 20 cm (schéma page suivante) et pour la DIMAC 23 cm (schéma page suivante).



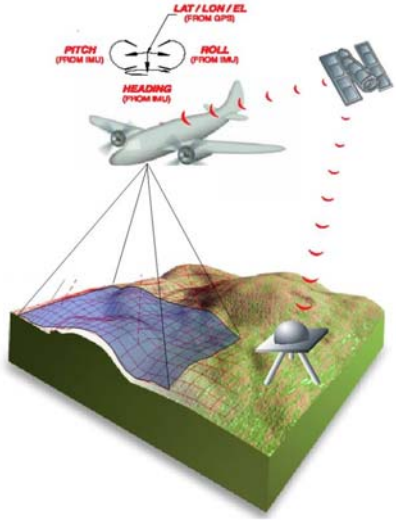

Caméra DMC ZEISS / IMAGING



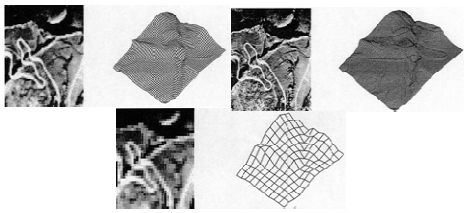

Caméra ULTRACAM D VEXCEL

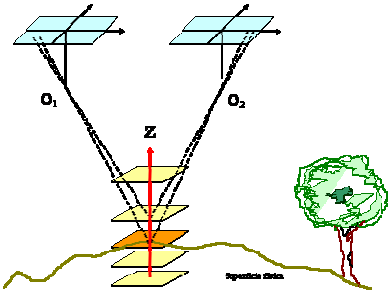



Toutes les caméras digitales (aussi bien d'avion que d'hélicoptère) sont intégrées à un système de positionnement GPS/inertiel qui permet de déterminer directement les paramètres de positionnement externe (photogrammétrie directe). On passe directement de l'acquisition à l'extraction des informations géométriques nécessaires à la construction du modèle numérique du terrain (schéma ci-contre).



Traitement des données : les algorithmes propres à la photogrammétrie numérique permettent d'obtenir en mode automatique des grilles de points irréguliers *ou* déjà régularisés, des ortophotos numériques, des ortophotos numériques solides et des modèles 3D réalistes (figure ci-dessous).

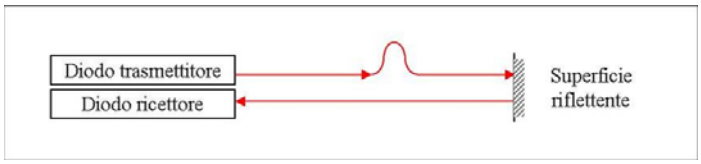


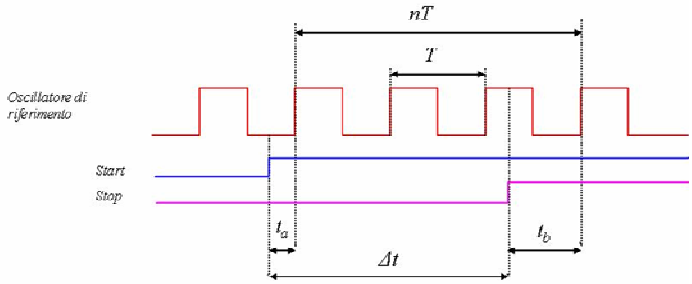


## (2) Lidar

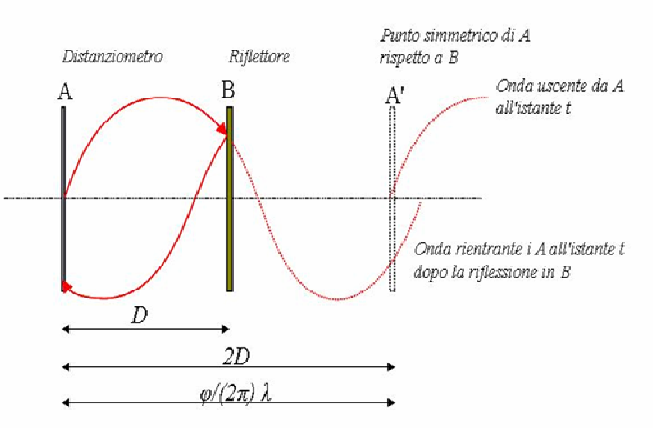
Principes : le laser scanner travaille en utilisant en mode actif un rayon laser pour la mesure de la distance, soit par la méthode à impulsion (mesure du temps de retour de l'onde, schéma : 2D=vΔt), soit par la méthode des phases (mesure du déphasage entre l'onde émise et l'onde reçue : D = L+nλ/2, schéma page suivante).

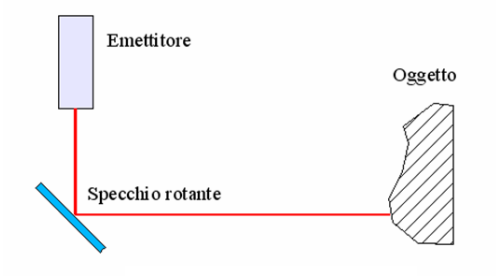
.

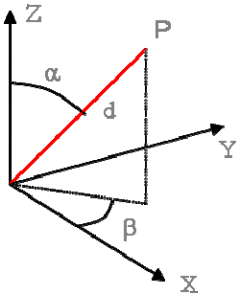



$$2D = v \cdot \Delta t$$



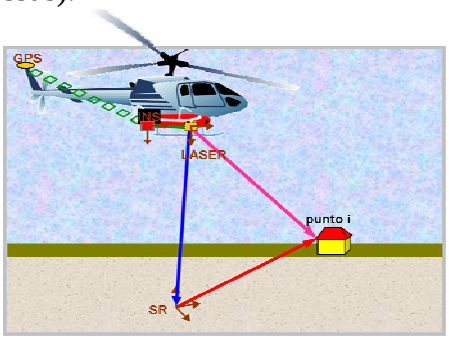



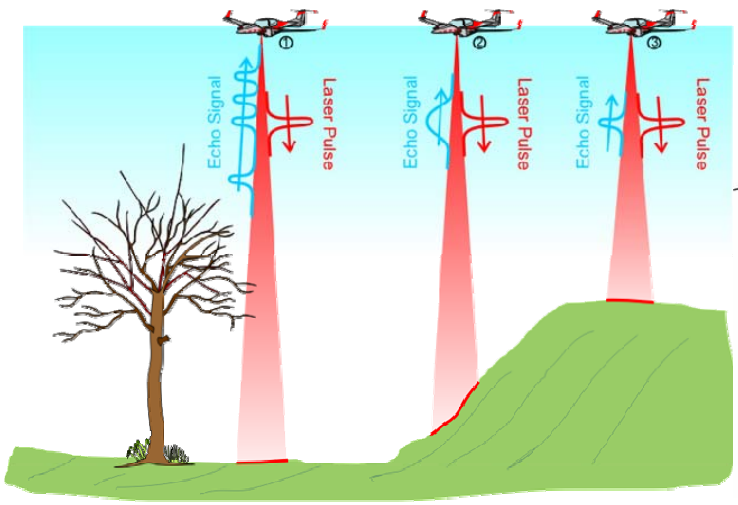




$$D - \frac{\varphi}{2\pi}\cdot\frac{\lambda}{2} + n\frac{\lambda}{2} \rightarrow D - L + n\frac{\lambda}{2}$$

Un miroir pivotant dévie dans l'espace le rayon selon une direction définie : la connaissance de la direction spatiale du rayon et de la distance mesurée selon cette direction permet le calcul des coordonnées spatiales du point (schéma de droite ci-dessus).

Positionnement cinématique : dans les solutions aéroportées, la direction selon laquelle est mesurée la distance est déterminée grâce à l'intégration d'un système constitué d'une plateforme inertielle et d'un récepteur GPS : le laser est fixé sur la plateforme, dont l'orientation est calculée par GPS et plateforme inertielle (ci-contre).



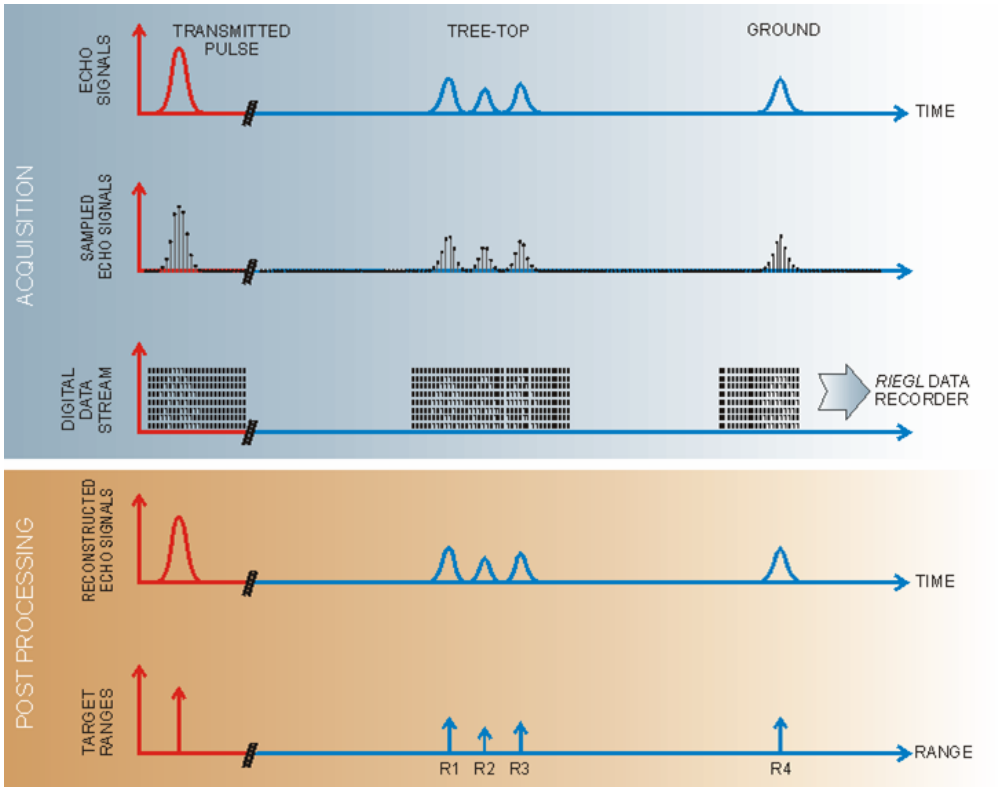



Acquisition des données : le laser émet une impulsion lumineuse qui se propage dans l'espace et se dirige vers le terrain. A cause du phénomène de dispersion, le diamètre du rayon augmente en se propageant dans l'air. Au moment de l'impact avec la surface, l'impulsion laser sera caractérisée par une surface d'impact et non un point unique. Quand la surface d'impact de l'impulsion laser rencontre un obstacle naturel ou artificiel (feuilles, lignes aériennes, corniches), celui-ci est réfléchi à un temps différent (schéma de gauche ci-dessus).

Les signaux de retour sont donc multiples, d'où la possibilité ou le besoin de mesurer un signal spécifique parmi les retours multiples du rayon (par ex. le premier ou le dernier retour) ou une série de retours.

La majeur partie des distansomètres laser permettent seulement d'avoir la mesure de la première impulsion réfléchie (la partie la plus haute de l'obstacle, par exemple les feuilles des arbres) ; dans d'autres cas on mesure seulement la dernière impulsion réfléchie (le terrain à la base de l'arbre, schéma de droite ci-dessus). Dans certains cas il est possible de mesurer jusqu'à 4 impulsions réfléchies. Pour qu'elles puissent être distinguées les unes des autres, il faut que la discontinuité décrite soit plus grande qu'une certaine valeur liée à la forme d'onde du laser (environ 1m). Si la discontinuité est plus petite, elle n'est pas détectable et la valeur de distance obtenue est en gros la moyenne des distances réelles des signaux de retour.

Les nouveaux capteurs sont en mesure de mesurer la forme d'onde complète du signal lumineux réfléchi. Ils calculent toutes les distances correspondant aux maximums de la fonction du signal retour (graphique ci-dessous).




L'acquisition des données peut se faire selon trois options différentes :

- Systèmes aériens fixes (***photos diapo 33***) : l'avion n'est pas prévu pour les situations d'urgence, à la différence de l'hélicoptère.
- Systèmes mobiles par hélicoptère : ***photos diapo 34***.
- Systèmes terrestres : la technique LIDAR peut s'utiliser également depuis le sol, pour des applications d'extension plus limitée, en fournissant des précisions centimétriques. Le traitement des données est plus complexe, mais le produit fini reste de toute façon de caractéristiques comparables à ceux obtenus par mesures aériennes (***photos diapo 35 et 36***).

Produits finis : la technique LIDAR trouve dans l'intégration avec la photogrammétrie numérique une de ses applications les plus intéressantes dans le domaine territorial. Les modèles numériques de terrains peuvent être revisités avec la radiométrie pour générer des

modèles 3D réalistes ; plus simplement et plus efficacement, les images utilisées en géologie et géotechnique pour la photo-interprétation peuvent être intégrées dans les informations 3D (images solides)

### (3) Radar SAR

Définition : la technique RADAR (RAdio Detection And Ranging) est basée sur l'émission d'ondes électro-magnétiques (EM) et sur le relevé des diffusions relatives. On extrait des caractéristiques du signal de retour les informations sur les caractéristiques et sur la position de l'objet observé. L'interprétation d'images Radar est moins intuitive que celle d'images optiques ; l'interaction entre l'énergie et la matière – à des fréquences de micro-onde- suivent des modalités différentes qu'en optique. Pour les applications qui nous concernent, le Radar a pour but de relever les caractéristiques des superficies de terrain observées. Dans ce contexte, le cible coïncide avec le point (ou surface) du terrain observé.
Un système Radar est composé de :

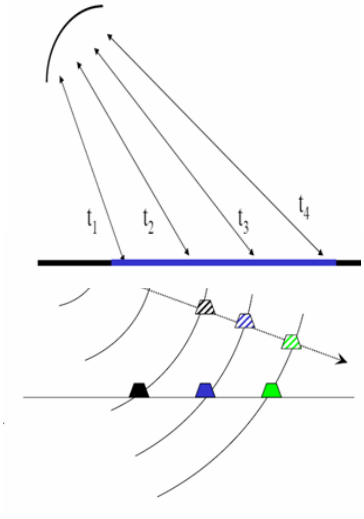
- un transmetteur qui génère l'onde EM et la transmet à l'antenne ;
- une antenne qui émet l'onde vers la cible (superficie terrestre ou marine, ou bien atmosphère) et enregistre le signal de rétrodiffusion ;
- un récepteur qui reçoit l'onde rétrodiffusée, l'amplifie et la traite pour améliorer sa qualité, et enfin envoie les résultats à la centrale d'enregistrement / stockage ;
- une centrale qui enregistre les signaux reçus à des fins de représentation et de traitements ultérieurs.

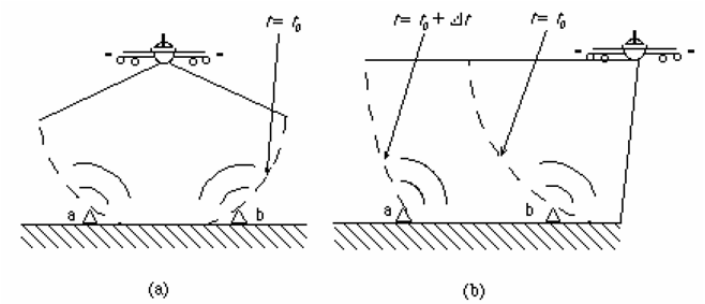
Une impulsion directe génère une série de retours, dus à la rétro-diffusion des parties de la cible. L'analyse de ces retours (signal réfléchi) permet de mesurer :

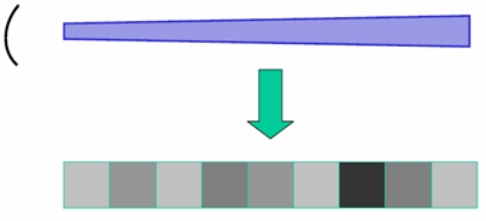
- la distance de l'objet qui a généré le retour ;
- l'intensité du retour radar.

Mesure de distance : à différents points du terrain correspondent différents chemins d'onde et donc différents temps d'allers-retours. Les signaux de retour sont calculés sur la surface terrestre (supposée plate en première approximation) à l'intersection des lignes isochrones et de la ligne qui représente la surface terrestre. Ceci a deux conséquences :

- les images radar sont affectées de fortes distorsions géométriques ;
- la cible peut être éclairée par le signal seulement latéralement.



A une impulsion radar correspond donc une séquence de retours, par ordre de distance croissante à la cible, chacun caractérisé par une intensité et phase propre.

Bande Radar : comme pour l'optique, le radar aussi peut fonctionner sur diverse longueurs d'onde (de 0,5 à 75 cm environ), pour lesquelles les réponses des cibles sont généralement différentes (tableau ci-contre).

Ex. (cf. figure de la ***diapo 42***) :

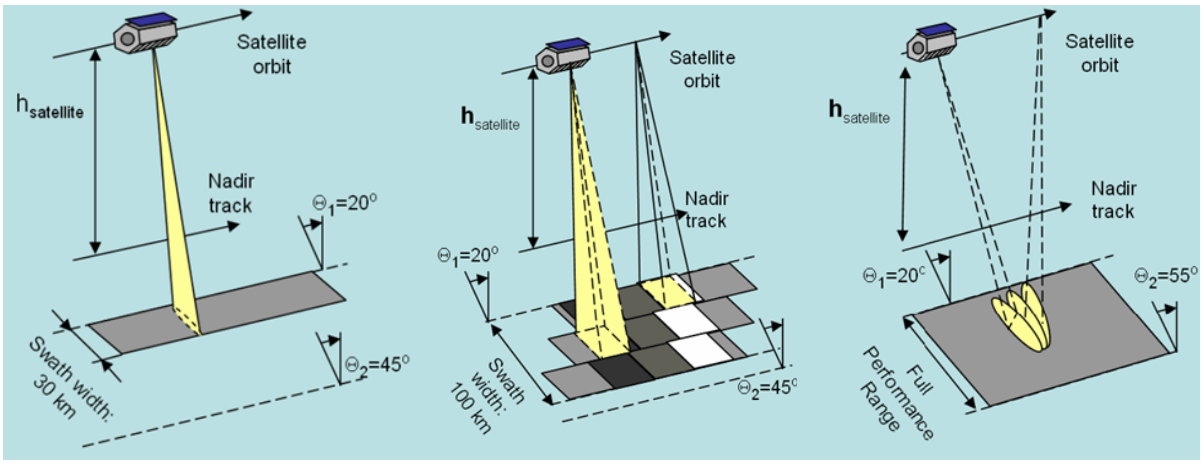
| | | |
|---|---|---|
| Bande C | → | glace, |
| Bande P | → | pénétration sous les feuilles, |
| Bande L | → | interprétation géologique. |

**Résolution**

La résolution en distance est la capacité pour le radar de discerner deux objets contigus : c'est la distance minimum qui doit exister entre deux objets qui génèrent un retour pour que le retour du premier ait cessé avant que le retour du second n'arrive.
La résolution en azimut (liée à l'angle de vol) est déterminée par la largeur du faisceau et les résultats sont moins bons avec la distance au capteur.

**SAR**

Le SAR est un radar de type conventionnel (SLAR, Side Looking Airborne RADAR) monté sur une plateforme mobile (avion, hélicoptère ou satellite). L'antenne du radar est pointée vers le sol orthogonalement à la direction du mouvement de la plateforme, avec un angle latéral compris entre 20 et 80° par rapport au Nord (schémas ci-dessous).




Les inconvénients principaux sont liés à la lourdeur des traitements du signal reçu, qui empêche d'avoir un résultat immédiatement disponible (les objets en mouvement sont en effet déplacés).

Une image SAR est une matrice numérique, dont les éléments sont des nombres complexes représentatifs de l'amplitude et de la phase du signal rétrodiffusé par la surface. Les objets qui se trouvent parallèles à l'antenne radar sont tous à la même distance du radar et sont donc représentés par un même pixel (il n'est pas possible de distinguer des objets entre eux, si distants soient-ils les uns des autres, s'ils sont contenu dans ce plan parallèle).

Sur la base des mesures du signal rétrodiffusé, les applications territoriales des données de SAR satellitaire et/ou aéroporté peuvent être divisées en 2 catégories :

- Identification et étude des surfaces ;
- Mesure des surfaces.

L'interférométrie SAR :
Elle utilise 2 images SAR de la même scène, acquises de positions légèrement différentes ; elle rend possible la génération et la mise à jour de modèles numériques de terrain, avec des résultats planimétriques qui dépendent des instruments utilisés (typiquement inférieur à 20m) et des précisions absolues, pour la détermination des cotes, de l'ordre de quelques mètres.

La phase interférométrique résulte de deux éléments :

1. La topographie de la scène observée ;
2. L'éventuelle déformation du terrain dans l'intervalle de temps qui sépare les deux acquisitions.

En soustrayant la composante topographique (en utilisant un MNT externe ou dérivé par interférométrie classique), il est possible d'estimer la composante due au déplacement. Cette technique est appelée Interférométrie Différentielle SAR (DinSAR).

Avec l'interférométrie SAR classique, on est en mesure d'estimer des mouvements de l'ordre du cm, mais en général il n'est pas possible de faire des estimations ponctuelles, seulement des analyses d'ensemble pour identifier des phénomènes macroscopiques (>0,2 km²).

**Technique PS**

La technique des réflecteurs permanents (Permanent Scatterers, PS) sert à la surveillance des phénomènes de déformations superficielles lentes (exemple d'application sur la Région Piémont : **§ 6.3** p. 207); elle est basée sur l'emploi de séries temporelles d'images radar satellites.

Principe : un petit sous-ensemble de cibles radar (PS, ou Point de Mesure Permanent PMP) maintient la même signature électromagnétique dans toute l'image, quelles que soient la géométrie d'acquisition et les conditions climatiques. Les PS sont typiquement des parties d'édifice, structures métalliques, affleurement rocheux ou tout élément toujours présent au sol dont les caractéristiques électromagnétiques ne varient pas sensiblement d'une acquisition à l'autre : ce n'est par exemple pas le cas de la végétation, sujette à des variations continues.

Points forts :

1. Possibilité de mesure ponctuelle ;
2. Mesure différentielle de précision élevée (ex. vitesses moyennes jusqu'à 0,1 mm/ an, déplacements verticaux jusqu'à 1mm et planimétriques jusqu'à 1cm).
3. Estimation et prise en compte des facteurs atmosphériques ;
4. Existence d'une archive historique (depuis 1992) qui permet des recherches sur les phénomènes passés ;
5. Réduction des coûts et des temps d'investigation pour la délimitation d'un territoire ;
6. Application « synergique » avec d'autres techniques de relevé (= possibilité de couplages) ;
7. Précision verticale de la mesure supérieure à la technique GPS ;
8. Densité élevée de repères radar (en zone urbaine jusqu'à 400 PS / km²), toujours présents sur place.

Points faibles :

1. Les mouvements rapides (>1cm/35 jours) ne peuvent pas être suivis sans informations a priori ;
2. La surveillance en temps réel est impossible : la fréquence d'acquisition des données est trop faible (35jours) ;
3. La mesure dans des zones sans cible radar n'est pas possible (à moins de prévoir le positionnement de repères artificiels, mais dans ce cas on perd l'avantage de l'archive historique) ;
4. La faible densité des PS dans les zones non urbaines peut rendre les réalisations difficiles ;
5. Le processus de traitement, pour être robuste, nécessite une quantité minimum de 25 à 30 images ;
6. Le temps de calcul est élevé (calculs lourds) ;
7. Il reste un problème de positionnement planimétrique correct des PS dans un système de référence adapté ;
8. Les cellules des images radar utilisées aujourd'hui par cette technique (images ERS) ont une résolution au sol de 25 m ;
9. Il existe une incertitude de positionnement planimétrique externe à la cellule (où est placée la cellule ?) et une interne à la cellule même (où se situe à l'intérieur de la cellule la cible que le signal de retour réfléchit ?)
   Cette difficulté peut parfois être contournée, en utilisant des ortophotos aériennes de la zone pour la reconnaissance visuelle d'éléments du terrain, à proximité de la position estimée du PS, qui peuvent devenir des PS eux-mêmes.

Améliorations possibles :

L'utilisation de séries d'images de divers capteurs contribue à :

- augmenter la fréquence d'observation ;
- augmenter le nombre de PS ;
- décomposer la composante du mouvement en vertical et horizontale.

Toutes les mesures effectuées à travers la technique PS sont de type différentiel. Cela signifie que toutes les estimations vont se référer à un point unique, supposé immobile, qui possède des caractéristiques radiométriques optimales. Si une information parvient sur un mouvement de ce point supposé stable, on pourrait facilement corriger la vitesse des autres points en sommant algébriquement la vitesse estimée et l'information relative au point de référence.

Applications

Il existe actuellement deux grands types d'application :

- La technique d'analyse SPSA, qui identifie les points de référence (PS), calcule les coordonnées géographiques relatives, estime les mouvements relatifs et la vitesse des déplacements sur une base temporelle différente afin de connaître les variations indicatives des phénomènes de glissement/éboulement en mouvement. Cette technique peut être appliquée à l'étude de portions étendues de territoire (au moins 100km²) pour identifier des phénomènes potentiels d'instabilité superficielle, dont le contrôle de détail est du ressort des investigations de terrain.
- La technique d'analyse APSA, qui augmente la densité des points PS, analyse une série multitemporelle complète de points de référence intéressants. Cette technique est appliquée pour l'étude de zones d'extension relativement modeste (environ 20 km²).

Pour améliorer et perfectionner l'analyse interférométrique, des études géologiques, géomorphologiques et géotechniques sont nécessaires, soit directement sur le terrain, soit par analyse historique (état de l'art).

**Expériences pratiques**

Le test s'est déroulé sur 4 sites :

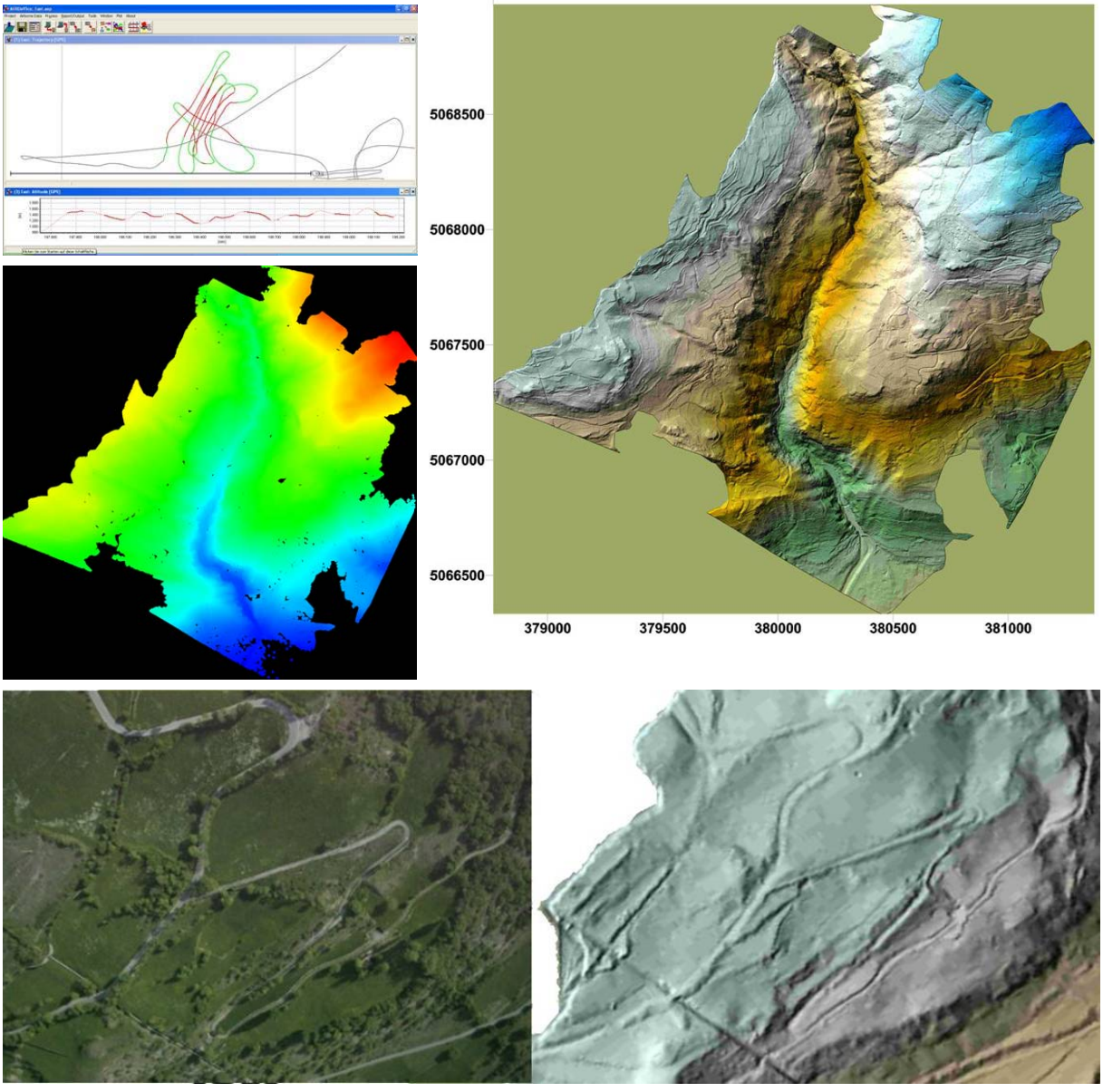
1. VOLLEIN (6.91 $Km^2$)
2. CHERVAZ (8.64 $Km^2$)
3. VALTOURNENCHE (19.93 $Km^2$)
4. BOSMATTO (7.69 $Km^2$)

L'équipe de recherche a utilisé un prototype, qui est désormais dans sa configuration de test final. Celui-ci intègre un scanner RIEGL basé sur le principe de l'analyse de l'intégralité du front d'onde.

Le programme des vols, leur exécution et le traitement des données ont permis d'établir des normes pour l'exécution en situation ordinaire et en situation d'urgence (cf. ***film des vols***).

Les résultats sur les 4 sites sont illustrés sur les ***diapos 55 à 62 du powerpoint***.

Exemple sur Vollein :




Expérience pratique d'acquisition des données SAR : l'exemple de Vollein

(En haut à gauche : cheminement du vol ; au-dessous : MNT brut (MNT non filtré) ; en haut à droite : MNT filtré en fausses couleurs ; en bas : comparaison entre l'orthophoto et le MNT)

**Propositions de techniques spécifiques**

Les techniques spécifiques pour la gestion des données LIDAR (intégrés à la photogrammétrie numérique) sont en train d'être complétées ; un manuel d'utilisation des données SAR est également en cours de rédaction, en tenant compte du fait que seules deux sociétés en Europe détiennent l'exclusivité du traitement de ce type de données selon des protocoles protégés par copyright.

## Conclusions

Les techniques de relevé présentées et l'expérience technique acquise permettent de définir de nouveaux scénarios pour la surveillance du territoire. Des analyses successives de données territoriales peuvent par exemple mener à conseiller l'installation de systèmes de surveillance géodésiques fixes. Les données SAR, couplées aux habituelles visites de terrains et à la vigilance locale, peuvent également alerter sur de possibles déclenchements de phénomènes dynamiques de terrain, ceci sur une portion de territoire étendu.

La disponibilité d'un hélicoptère équipé d'un système LIDAR intégré avec photogrammétrie numérique peut offrir des services d'urgence dans des délais raisonnables (en situation ordinaire également), en ciblant les interventions là où les données SAR indiquent des mouvements anormaux. Ce même hélicoptère LIDAR/photogrammétrie peut être utilisé pour d'autres actions de surveillance : torrents, glaciers, avalanches, mais il est important qu'il soit toujours présent sur place ou à proximité afin de garantir une intervention rapide.